

氏名	小 川 伸一郎
学 位 の 種 類	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	第4189号
学位授与年月日	平成14年 9 月26日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当者
学 位 論 文 名	超流動中における量子渦の再結合と音波の放出 (Reconnection and Acoustic Emission of Quantized Vortices in Superfluid)
論文審査委員	主 査 教 授 飯 田 武      副主査 教 授 畑 徹 副主査 助教授 坪 田 誠

### 論 文 内 容 の 要 旨

極低温領域において量子効果により液体ヘリウムが超流動状態になることが知られている。粘性の無い流動である超流動は、超伝導と並び、低温物理学を代表する重要な現象であり、その発見以来膨大な研究が行われてきた。

一般に流れのある流体中には渦が存在できる。超流動ヘリウムでもその巨視的量子コヒーレンスにより量子渦の存在が許されるが、量子渦が再結合するかどうか、その際に音波を放出するかどうかは自明ではない。本論文では超流動のダイナミクスを記述するGross-Pitaevskii方程式の数値計算により、渦芯が繋ぎ変わる過程、再結合時の音波の放出とその伝播、放出された音波による渦まわりの循環流の消滅などを明らかにした。これらの知見は、近年興味を持たれている極低温領域における超流動乱流の理解に深く寄与するものである。

#### (1) 量子渦の再結合過程の詳細

2本の直交する量子渦が、古典流体中の渦と同様の過程をたどり再結合することを示した。再結合がKelvinの循環定理に抵触しないことも明らかにした。

#### (2) 反平行な渦対の消滅と音波の放出

2次元の渦対の運動を解析した。渦対は互いに近づき、Cherenkov共鳴を起こす。連続的に音波が放出され、渦対が消滅する。このとき放出された音波が、渦まわりの循環流を乱し、最終的に消滅時に放出される音波により循環流が消えることを示した。

#### (3) 多段再結合過程

直交する2本の量子渦が再結合によって渦環へと分裂し、その渦環が消滅するときに音波を放出することを示した。これはFeynmanのカスケード過程の最終段階であり、極低温領域における超流動乱流の減衰の主要因であると考えられる。

#### (4) エネルギー変化

超流体の全エネルギーを4つの成分に分割し、それぞれの時間変化から上記3種類のダイナミクス間の相違を調べた。渦糸の再結合時に放出される音波は、外部にはほとんど放出されずに周囲の渦芯と相互作用するが、渦環の消滅時に放出された音波は、その周囲にほとんど渦芯が存在しないため、外部へと伝播する。現実の系ではこれが素励起へと転化するため、系の温度上昇に繋がる。

## 論文審査の結果の要旨

液体ヘリウムは、極低温において、量子効果により粘性を消失した超流動状態に移転する。この超流動状態では、量子流体に特有な量子渦と呼ばれる渦が存在し、その物理に深く関与することが知られている。例えば、超流動ヘリウムを高速で流したとき、量子渦が3次元的に複雑に絡み合った渦タングルを作ることによって超流動性が破壊される。量子渦は古典粘性流体中の渦とは大きく異なる性質を持つため、量子渦が複雑な3次元運動を行い接近したとき、通常の渦のように渦芯を繋ぎ替える、即ち再結合するか否かは自明ではない。

本論文は、超流動状態を記述する巨視的波動関数に対するグロス・ピタエフスキー方程式の数値解析により、量子渦の再結合過程を解明するとともに、再結合に伴い音波が放出されることを見いだしている。得られた主な結果は以下のとおりである。(1) 2本の直交する量子渦の再結合過程の詳細を調べ、両者は局所的に反平行になるように接近し、渦芯内の密度の零点が1点で交差することにより再結合が起こる。この挙動のために、量子渦の再結合は、非粘性流体中の循環の保存を主張するケルビンの循環定理に抵触しない。(2) ある臨界距離以内に位置する反平行な渦対は、チェレンコフ共鳴により接近かつ音波を放出し、最終的に対消滅を起こす。(3) 超流体の全エネルギーを、非圧縮性運動エネルギー、圧縮性運動エネルギー、量子エネルギー、内部エネルギーに分割し、種々の再結合過程における各成分の特徴的な変化を明らかにした。量子渦が消滅する場合は音波の放出に伴い圧縮性運動エネルギーが増加するが、再結合後も渦がその近傍に残存する場合は、放出音波が渦と相互作用するため、顕著な圧縮性運動エネルギーの増加には至らない。

このように本研究は、極低温超流動の物理に関し独創的な研究を行い、巨視的量子現象に関する新たな知見を提供したものであり、博士(理学)の学位を授与するに値するものと認められると審査した。